

# ÇOK DÜŞÜK SICAKLIKLARDA SIVILAŞTIRILAN İKİ GAZ

## NİTROJEN VE HELYUM

“Hiç bir şey yoktan var olmaz, varolan bir şey yok olmaz.”

Bu ünlü söz, maddenin alabileceği hal değişimlerinin bir anlatımı sayılabilir. Maddeler, evrende üç halde bulunurlar; katı, sıvı ve gaz. Yine her madde, uygun koşullar oluştuğunda ya da oluşturulduğunda, bir halden diğerine, yani katı halden, sıvı ya da gaz haline, gaz halinden de sıvı ya da katı hale dönüşebilir. Nitrojen ve Helyum gazları da bu genel kurala uyararak sıvı hale dönüşebilirler, ama çok özel koşullarda...

Bir ortamın fiziksel bir durumunu anlatan “soğuk” sözcüğü Türkçe sözlükte “sıcaklığı düşük olan, sıcak karşıtı ya da üşütecek sıcaklık” açıklamasıyla verilmekte. Çoğu zaman insani davranış olarak üşüten, titreten ya da donduran fiziksel bir olgudur aslında soğuk; bilimsel olarak da “düşük sıcaklık” nitelemesiyle tanımlanır. Sibirya’da 1892 yılında ölçülen -69,8 °C, Antarktika’daki Vostok Çölü’nde 1983 yılında ölçülen -89,2 °C, ya da ülkemizde Ağrı’da 1972 yılında -45,6 °C ölçülen sıcaklıklar, dünyanın ortalama 15,5 °C sıcaklığıyla kıyaslandığında, canlının yaşamını sürdürmesini neredeyse olanaksız kılar. Bu denli düşük sıcaklıkların, sadece düşüncesi bile içimizi titretirken, bilimsel çalışmalarda ya da çeşitli ticari amaçlarla kullanılan nitrojen ve helyumun sıvılaştırılması sürecindeki sıcaklıklar, hayal sınırımızı gerçekten zorlayacak denli düşük.

### Nitrojen ve Helyum

Evrendeki bolluğu açısından elementler arasında altıncı sırayı alan nitrojen, renksiz, kokusuz, tatsız, ametal özelliğinde kimyasal bir element. Periyodik tabloda Va grubunda yer alıyor; atom numarası 7, erime noktası -210 °C, kaynama noktası -195,8 °C. Yer atmosferi yani hava, hacimce %78, ağırlıkça %75 oranlarında

nitrojen içeriyor. Oda sıcaklığında kimyasal etki göstermeyen eylemsiz bir gaz olmasına karşın, organik ya da organik olmayan çok sayıda kimyasal bileşik oluşturabiliyor.

Helyum, hidrojenden sonra evrende en çok bulunan gaz. Nitrojen gibi, renksiz, kokusuz, tatsız. Ancak hemen hiç kimyasal tepkime yapmıyor, yani bileşik oluşturmuyor. Periyodik tabloda 0 grubu elementler (soy gazlar) arasında yer alıyor; atom numarası 2, erime noktası yok, kaynama noktası -268,6 °C. Yıldızlarda yoğunlaşmış olarak bulunan helyum, ne yazık ki dünyamızda çok ender bulunuyor; havanın milyonda birini oluşturuyor. Bu nedenle de yeryüzünde bazı radyoaktif minerallerin bozunmasıyla ortaya çıkabiliyor, mineral yataklarında ya da doğal gazda çok az miktarda bulunabiliyor.



### Sıvılaşma

Kabaca söylemek gerekirse, bir gaz soğutulduğunda, gazı oluşturan parçacıklar daha yavaş hareket eder. Yani kinetik enerjileri azalır. Hareketi sağlayan kinetik enerjinin azalmasıyla, birbirine komşu parçacıklar, aralarındaki çekim kuvvetine yenilerek birbirlerine yapışırlar. Bu, gazın sıvılaşması ya da maddenin gaz halinden sıvı haline dönüşmesi anlamına gelir.

Nitrojen ve helyum gazları, üzerlerine uygulanan basınç ne kadar artırılsa artırılsın, belirli bir sıcaklık değerine ya da daha altına inilmedikçe asla sıvılaşmazlar. Her gaz için ayrı bir değeri olan bu sıcaklığa kritik sıcaklık denir. İrlandalı fiziksel kimyacı Thomas Andrews, 1869’da yaptığı çalışmalarla, belirli bir gazı, sabit sıcaklıkta sıkıştırarak sıvılaştırmak için gerekli olan koşulları belirlemiş ve bir kritik sıcaklık eğrisi oluşturmuş. Bu eğri üzerinde gaz ve sıvı haller arasındaki görünür ayrımı tanımlayan noktaya da kritik nokta adını vermiş. Sıkıştırılan gazın sıcaklığı, bu kritik noktaya karşılık gelen kritik sıcaklıktan yüksekse, sıkıştırma işlemi gazı sıvılaştırmaz; ancak, kritik noktanın altındaki sabit bir sıcaklıkta sıkıştırılan gaz her zaman sıvılaşır. Ek olarak, gaz sıkıştırılırken, sıcaklığı kritik noktanın hemen altında tutulursa, sıvılaşma sırasındaki hacim değişikliği küçük olurken, tam kritik sıcaklıkta sıkıştırılması durumunda, gaz hacim değişikliğine uğramadan sıvı hale geçer.

Nitrojen gazı için kritik sıcaklık değeri -196 °C, helyum gazı içinse -268 °C. Bu şaşırtıcı sıcaklıkları algılamak çok güç. Ama sıvılaştırılmış bu gazların, özellikle de sıvı nitrojenin, yüksek soğutma gerektiren bilimsel, teknolojik ya da endüstriyel pek çok alanda, örneğin, dondurma yapımından, güdümlü füzelere, bilimsel deneylere kadar; sıvı helyumunsa daha çok MRI gibi tıbbi ci-



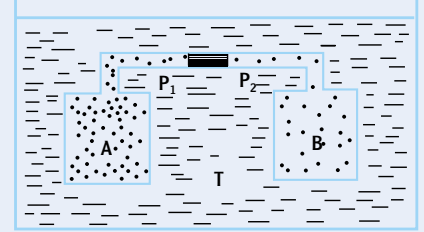
Sıvı nitrojenle etkileşen cisimler, ilk anda kaynarlar sonra hızla donarlar.

hazlarda ya da bilimsel deneylerde yaygın olarak kullanıldığı, her ikisinin de birer ticari ürüne dönüştüğü dikkate alınır, gereken sıcaklık değerlerinin elde edilmesi için bazı mekanizmaların geliştirilmiş olması şaşırtıcı değil.

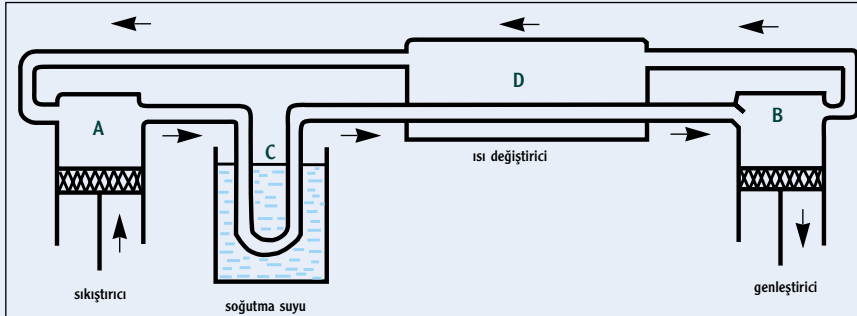
## Sıvılaştırma Mekanizmaları

Gazların sıvılaştırılmasında, genel olarak iki yöntem uygulanmakta.

Eşentropi soğutma yönteminin temel işleyiş mantığı şöyle: Aynı sıcaklık değerinde basınç bir değerden diğerine değiştirildiğinde entropi (bir sistemin düzensizlik derecesi) azalır. Entropi sabit tutularak, basınç değiştirilirse, sıcaklık bir değerden bir başka değere düşürülmüş olur. Sabit ısı (adiyabatik) bu eşentropi süreci aynı zamanda tersinir özellik gösterir. Bu haliyle de termodinamiğin 2. yasasına göre en kazançlı soğutma yöntemi olarak bilinir. Ancak unutmamak gerekir ki, ter-



Şekil 2; A silindirinde bulunan gaz, gözenekli seramik filtreden sabit ısı ama tersinir olmayan bir süreçle B silindirine dolarken sistemin sıcaklığı değişir. Kullanılan filtre gaz akışını engellediğinden  $P_1$  basıncı  $P_2$  basıncından daha büyüktür. Yani filtreden geçen gaz genişler. Bu genişleme sürecinde gaz bir iş yapar, ama yapılan iş, eşentropi soğutmadan farklı olarak, molekülleri birbirinden uzaklaştıran bir iç iş şeklinde olur. Bu olay parçacıkların potansiyel enerjilerini artırırken, kinetik enerjilerini düşürür. Sonuç olarak sistemin sıcaklığı düşer.



Şekil 1: Eşentropi soğutma: Sıkıştırılan gaz A'dan sıcak olarak çıkar ve sıkıştırma ısı, C'de soğutma suyuyla alınır. Gaz, genleştirici bölüme (B) geldiği zaman, ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüşür. Böylece gaz, B'den ayrılırken soğumuş olur. Gaz, A'ya geri dönerken D'de sıkıştırılmış gazı taşıyan borunun çevresinden geçer. Isı değiştiricinin görevi, sıkıştırılmış gazı B'ye girmeden önce soğutmaktır. Bu yolla, her B'ye gelen gaz her seferinde bir öncekinden daha soğuk olur. B sürekli soğuduğu için de, bir süre sonra sıvılaşma başlar.

modinamiğin 3. yasası, "mutlak sıfırda ( $-273^\circ\text{C}$ ) entropi değişimi sıfır olur" der. Bu nedenle sıcaklık hiç bir zaman  $-273^\circ\text{C}$ 'ye kadar düşemez; ancak eşsıcaklık süreçleriyle, sabit ısı genleşme süreçlerinin uygulandığı işlemlerle, mutlak sıfıra yakın değerlere kadar sıcaklığı düşürmek olası. Bu işlemlerle mekanik iş ısıya, ısıdan da mekanik işe dönüştürülür. Bu temele dayanan

## Anımsayalım

Termodinamiğin birinci yasası olan enerjinin korunumu, enerjinin bir biçimden bir başka biçime dönüşümünde, toplam enerjinin değişmezliğinin anlatımından başka bir şey değil. Termodinamik, fizik biliminin ısı, iş, sıcaklık ya da çeşitli enerji türleri arasındaki ilişkilerle, fiziksel sistemlerin denge ya da dengeye yakın durumlardaki davranışlarını inceleyen bir alt dalı. Termodinamiğe göre her fiziksel sistem, çevresiyle enerji ya da madde alışverişi yapsın ya da yapmasın, basınç, sıcaklık, kimyasal bileşim vb. özellikleri tanımlanabilen kararlı bir duruma (denge durumu) kendiliğinden ulaşır. Dış etkiler değiştiğinde, örneğin, sistemin genişlemesine izin verildiğinde, denge durumuna ilişkin özellikler de genellikle değişir. Bu değişimlerin matematiksel anlatımı ve oluşan yeni denge koşullarının belirlenmesi termodinamiğin ana uğraşı.

Bir sistemdeki enerji dönüşümlerini anlaşılır kılan kavram enerjinin kendisi değil, o sistemin düzensizlik derecesini anlatan ve entropi adını alan kavram. Termodinamiğin ikinci yasası, "dış etkilerden yalıtılmış kapalı bir sistemde, entropi azal-

maz" der. Bir sistem başlangıçta düşük entropili yani düzenli bir durumda bulunuyorsa, sistemin kendisi, en büyük entropili yani, en düzensiz duruma gitme eğilimi gösterir. Örneğin, sıcaklıkları farklı iki metal parçasını, enerji alışverişi yapacak biçimde yan yana getirirsek, bu iki metal arasında, başlangıçta, dengesiz bir sıcaklık dağılımı oluşur. Söz konusu dengesiz dağılım, aslında enerjinin belirli bir düzenlilik içinde olduğunu gösterir. Sonra, ısı enerjisi sıcak metalden soğuk olana akar. Böylece, başlangıçtaki dengesiz sıcaklık dağılımı hızla değişirken, sistem de hızla, her iki metalin sıcaklığını birbirine eşit kılan bir duruma erişmeye çalışır. Metaller arasında sıcaklık eşitliği sağlandığında da sistem dengeye ulaşır, yani düzensizliği artar.

Maddenin halleri kinetik molekül kuramının geliştirilmesiyle anlaşılmış. Bu kurama göre maddede oluşan atom, molekül gibi parçacıklar sabit hızla hareket ederler. Hareketin kaynağı ısı enerjisi. Parçacığın ısı enerjisi arttıkça, hareket hızı da artar. Bir gazda, parçacıklar arasındaki çekim kuvveti düşük, parçacıkların potansiyel enerjisi yüksektir. Bu da parçacıkların rasgele ve serbest, diğer parçacıklardan hemen hiç etkilenmeden hareket etmesine neden olur; ama bu hareket aynı yol

üzerindeyse birbirleriyle çarpışabilirler. Çarpışma sırasında enerji kaybı olmaz ama, parçacıklar arasında enerji alışverişi olabilir. Entropi kavramı ve termodinamiğin ikinci yasası, maddeyi oluşturan atom ve moleküller gözününe alındığında daha iyi anlaşılabilir. Bir gazın sıcaklığı ve basıncı, o gaz parçacıklarının serbest ve rasgele hareketinden kaynaklanır. Rasgele etkiler altında kalan her sistem, sonunda en düzensiz duruma alır. Maddenin hal değişiminde, sıkıştırma ve genleşme en önemli rolü üstlenir. Sıkıştırma, hacmi daralan gazın, atom ya da moleküllerinin artan hareketi basınç ve sıcaklığı artırırken, genleşme sırasında da, hacmi genişleyen gazın, atom ya da moleküllerinin azalan hareketi basınç ve sıcaklığı düşürür.

Bir gazın basıncı, hacmi ve sıcaklığı kolayca ölçülebilen özellikleri. Bu özellikler arasındaki bağıntı Boyle-Mariotte yasasıyla verilir. Yasa, sabit sıcaklıkta, belirli bir miktardaki gazın basıncının, hacmiyle ters orantılı değiştiğini, basınç ve hacim çarpımının da bir sabite eşit olduğunu söyler. Gay-Lussac adıyla bilinen bir başka yasa da, sabit sıcaklık altında, belirli bir miktardaki gazın kapladığı hacmin, mutlak sıcaklığıyla doğru orantılı değiştiğini, sıcaklığa bölünen hacmin bir sabite eşit olduğunu söyler.



## Uzmanlara Sorduk

Ülkemizde de sıvı nitrojen ve helyum üretimi, hem ticari amaçlı firmalarca, hem de Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü'nde, bölümde yapılan bilimsel çalışmalarda kullanılmak üzere üretilmektedir. Sıvı nitrojen ve sıvı helyumun üretilme süreçlerini daha iyi anlayabilmek için uzmanlara başvurduk.

### Nitrojeni nasıl sıvılaştırıyorsunuz?

Öncelikle hava, bir motor aracılığıyla emiliyor. Emilen hava, sıkıştırıcıya iletiliyor. Hem yağlamalı hem de su soğutmalı bir sistem olan sıkıştırıcı, havayı yaklaşık 200 atmosfer basınca kadar sıkıştırıyor. Basıncı hava soğurucu adını alan kolona aktarılıyor. Soğurucu kolonunda kimyasal bir yapı içinden geçen hava, nitrojen ve oksijen dışındaki tüm maddelerden arıtılıyor yani; havayı oluşturan diğer gazlar, kimyasal yapı tarafından soğuruluyor, sadece gaz halinde nitrojen ve oksijen kalıyor. Karbonmonoksit, karbondioksit, su buharı gibi gazların sıvılaştırma sistemine sızması, sıvılaşmayı engeller. Bu nedenle, sadece oksijen ve nitrojenden oluşan basınçlı hava ana kuleye iletilir; ana kulede, bir buzdolabı sistemindeki gibi freon gazının oluşturduğu bir ön soğutmayla, sistem sıcaklığı yaklaşık  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar düşürülür. Bu soğutma sırasında doğal olarak, basınç da oluşacağı için, önce sıvılaşma noktası ya da kaynama noktası daha düşük olan oksijen yaklaşık  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sıvılaşır. Sıvılaşan oksijen ortamı daha da soğutuyor; nitrojen gazı bu soğutulmuş oksijen etrafında gezdiriliyor. Oksijen nitrojenin ısısını alarak yeniden gaz haline geçerken, bu arada iyice soğuyan nitrojen yaklaşık  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sıvı hale dönüşüyor. Sıvılaşmış nitrojen, bir çıkış ünitesi yardımıyla tanklara dolduruluyor ve deneylerde kullanılmak üzere "dewar" denen, ısı yalıtımı oldukça yüksek kaplarda depolanıyor.

**Deneyde kullanılmak üzere alınan örneğin, bir litre sıvı nitrojenin ya da helyumun 1 atm basınç ve oda sıcaklığında buharlaşması ne kadar sürüyor?**

basit bir sıvılaştırma makinesinin işleyiş şekli 1'de gösteriliyor.

Sıvı nitrojenin elde edilmesinde kullanılan yöntem de buna benzer. Ancak, hava kullanılarak sıvılaştırma yapılacaksa, bir tür damıtma işlemiyle

Sıvı nitrojenin gaza dönüşme süresi ortamın sıcaklığına bağlı olarak değişiyor. Bir litre sıvı nitrojen  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 15-20 saatte gaza dönüşebilir. Buharlaşma çok hızlı değil. Basınç ortadan kalktığı için, sadece sıcaklığa bağlı bir buharlaşma söz konusu. Bu süre, sıvı nitrojen ısı iletimi düşük, köpükten yapılmış bir kap içindeyse söz konusu. Ama, herhangi bir metal kaba koyulan sıvı nitrojen, 1-2 saat içinde tümüyle buharlaşabilir. Buharlaşmada, ısı iletimi kadar yüzey genişliği, yüzey sıcaklığı gibi unsurlar da belirleyici. Sıvı helyumda bu süreler çok daha kısa.

### Helyum sıvılaştırılması nasıl yapılıyor?

Sıvılaştırma üç aşamada yapılıyor. Kullandığımız sistemde, çok genel anlamıyla, tüplerdeki sıkışmış gaz genleştiriliyor. Genleşen gaz bir miktar soğuyor. Genleşen gaz gelen gazı da ısı değiştirici sistemiyle bir miktar soğutuyor. Gazlar pistonların üzerinde iş yaparken yeniden enerji kaybediyor ve biraz daha soğuyor. Son aşamada da Joule/ Kelvin olayıyla soğutarak, helyumu sıvılaştırabiliyor. Helyum sıvılaştırmada kullandığımız bu sistem yeni sayılmaz ama bölümümüzde daha yeni teknolojiyle üretilmiş, yeni kapalı devre helyum soğutma sistemleri de var. Deney sırasında, örneğin konduğu hacmin soğutulacağı yer de kapalı bir sistem. Bu yeni sistemle yaklaşık  $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar soğutma yapılabilir.

Aslında, helyum gazını sıvılaştırmak, nitrojen gazını sıvılaştırmak kadar kolay değil. Bunun iki farklı nedeni var. Birincisi helyumun sıvılaşma sıcaklığının çok düşük olması, ikincisi de helyumun havada çok az miktarda bulunması. Bu azlık nedeniyle, helyum gazı satılan bir ürün. 10 metreküplük bir helyum tüpünü yaklaşık 200 USD karşılığında edinmek olası. Bir tüp gaz sıvılaştırıldığında, 10 litreyi aşan miktarda sıvı helyum, yani kabaca bir metreküpten bir litre sıvılaşmış helyum elde ediliyor. Elektrik giderleri, işçilik vb. üretim giderleri dahil edilmezse 200 USD harcayarak 10 lt sıvı helyum elde etmiş oluyorsunuz. Sıvılaştırılmış

öncelikle saf nitrojen elde ediliyor.

Eşentropi soğutma yöntemi bazı sakıncaları içeriyor. Bir yanda yapısındaki hareketli pistonlar yağlama, sarıntı ve gürültü gibi sorunlar yaratırken, bir yanda da gaz soğudukça, ba-

helyumun kendisini almak aslında daha ucuz; 10 lt sıvı helyum için 100 USD ödeyebilirsiniz.

**O halde, sıvılaştırma işlemini neden burada yapıyorsunuz?**

Bölümümüzde, bir kapalı devre helyum sıvılaştırma sistemi var. Sıvılaştırılan ve deneylerde kullanılan, bu sırada da buharlaşan helyumu, toplayıcı hatlarla yeniden biriktirip, sıvılaştırabiliyoruz. Aslında yeniden toplanan gaz, bir miktar su buharı vs. kirlilikler içerse de, temizlenerek, %10 kayıpla yeniden sıvılaştırılıyor; bu da üretim maliyetlerini biraz azaltıyor.

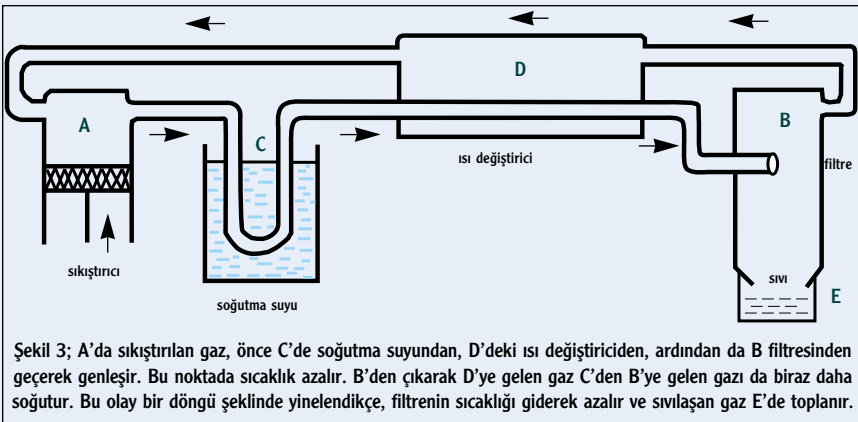
### Canlı dokuya nasıl etkiliyor?

Bir canlı dokuya örneğin, elinize nitrojen döktüğünüz zaman, kaynar su ya da yağın yakmasındaki gibi bir yakma etkisi yapıyor ve yanma hissi veriyor. Yanan doku kabarıyor ve su topluyor. Yanmakla, bu şekilde bir soğuğa maruz kalmak arasında bir fark yok. Canlı dokunun geri kazanımsız yanma derecesine çok bağlı. Üçüncü derece bir yanıkta nasıl doku kazanılıyorsa, burada da durum aynı ama daha yüksek derece yanıklarda geri dönüş oldukça zor.

### Sıvı helyum ya da sıvı nitrojen nerelerde kullanılıyor?

Fizikçiler, malzemelerin fiziksel özelliklerini ve tanımlanmalarını yapabilmek için, sıcaklığa bağlı fiziksel özelliklerin değişimini irdelemekte kullanıyorlar. Hangi malzemenin, hangi sıcaklıkta ne tür davranışlar gösterdiğini anlamak önemli; örneğin üstüniletkenler soğutulmuş elde edilen malzemeler; belli bir kritik sıcaklığın altına düşüldüğünde zaman bu malzemenin elektrikal direnci sıfıra inerek mükemmel bir iletken özelliği gösterir hale geliyorlar. Sanayide örneğin, teleskop, CCD ya da benzeri malzemelerin soğutulmasında; tıpta aşı ilaç gibi malzemelerin korunmasında ve MRI cihazlarının üstüniletken yapılarının soğutulmasında, askeri ve uzay çalışmalarında roket ya da güdümlü füzelerin ısı yalıtımında ve daha pek çok alanda kullanılıyor.

Dr. Şadan Özcan, Mehmet Gürbüz,  
Süleyman Sabuncuoğlu  
Hacettepe Üniv. Fizik Müh. Böl.  
Alçak Sıcaklıklar Fiziği Laboratuvarı



sınca karşı sıcaklık düşme hızı azalabiliyor. Bu sorunlardan kurtulan ikinci yöntem Şekil 2'de anlatılan Joule-Kelvin olayına dayanır. Bu olaya dayanan basit bir sıvılaştırma makinesinin işleyiş de şekil 3'de veriliyor.

Bu yöntemeye dayanarak yapılan ve çok düşük sıcaklıklar elde edilebilen işleyiş, Helyum gazının sıvılaştırılmasında kullanılır.

Serpil Yıldız

- Kaynaklar  
T. Fırat, "Gazların Sıvılaştırılması ve Alçak Sıcaklıkların Elde Edilmesi" konusunda sözel kaynak  
<http://www.uk.ac.uk/physical-sciences/>  
<http://www.irreversiblesystems.com/>  
<http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/kinth.html>  
<http://www.ehs.ucsd.edu/lab/1902.htm>  
<http://learn.chem.vt.edu/tutorials/lsp/properties/critpressure.html>  
[http://www.users.qwest.net/~csconductor/Experiment\\_Guide/Resistance%20vs%20Temp.htm](http://www.users.qwest.net/~csconductor/Experiment_Guide/Resistance%20vs%20Temp.htm)  
<http://members.linnet.net.au/~jacob/worldtp.html>  
<http://www.meteor.gov.tr/>